

**DÉVELOPPEMENT D'UN
LOGICIEL DE CALCUL MCE
« *Méthode de Calcul Etendue* »
POUR DIMENSIONNEMENT DE POÊLE DE
MASSE**

Porté par

l'Association Française du Poêle Maçonné Artisanal – AFPMA

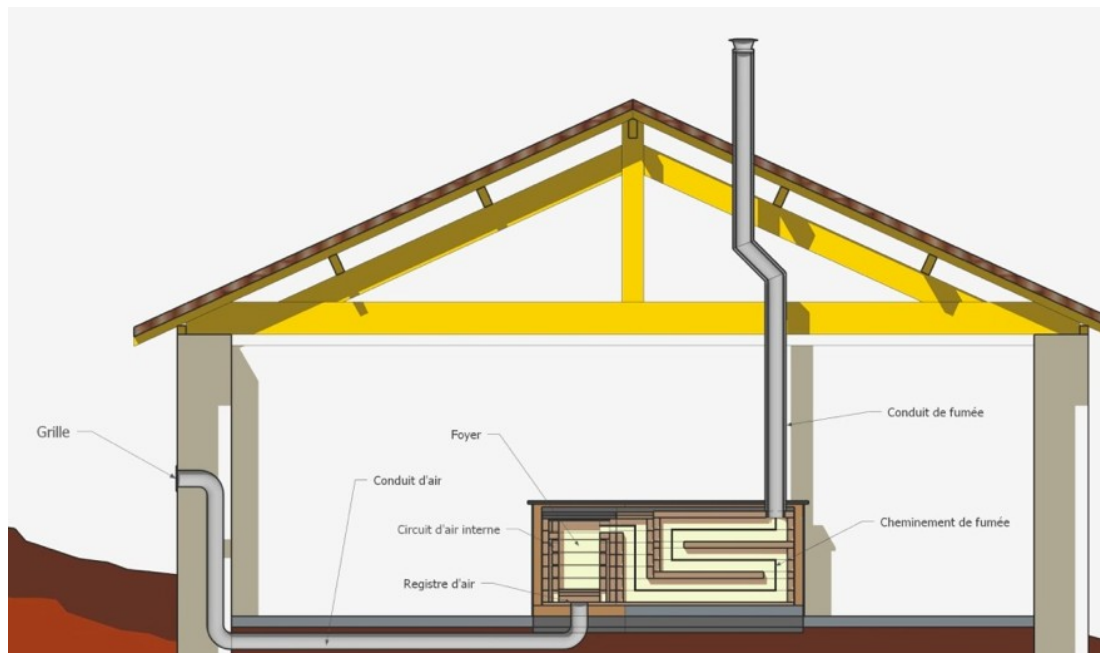


www.afpma.pro

LE PROGRAMME SCIENTIFIQUE



Architecture d'un poêle de masse



Le poêle de masse doit être considéré comme une installation complète, partant de la prise d'air extérieure à la sortie de fumée en passant par le foyer et l'échangeur de chaleur (ou cheminement de fumée).

Le foyer et l'échangeur peuvent prendre des formes très variées, ils sont adaptés à chaque contexte particulier (hauteur de conduit, support encombrement). Chaque installation est unique, ce qui nécessite un calcul systématique et prenant en compte une diversité de paramètres. De plus il existe de nombreuses approches différentes des composants du poêle parmi lesquels:

Pour les foyers:

- eco-labellisé à combustion sur lit de cendre (foyer de type autrichien)
- sur grille avec ou sans arrivée d'air supérieur
- tirage inversé
- Type rocket avec cheminée interne ("heat riser")

Échangeurs:

- Carreaux "carrés" autrichiens
- Contre-courant finlandais
- Cloche russe
- Échangeurs métalliques (plaque de cuisson, bouilleur, air chaud)

Pour qu'un foyer produise les meilleurs résultats, il est important de garantir des conditions de tirage et de débit satisfaisantes. Ces conditions sont propres à chaque type de foyer et dépendent aussi des caractéristiques de l'échangeur de chaleur, de l'amenée d'air et du conduit de fumée. Elles peuvent être calculées.

État de l'art

Les parties concernant l'arrivée d'air et le conduit de fumée sont déjà bien décrites par la norme EN13384.

À ce jour, seuls les poêles de masse artisanaux de type autrichiens ont été étudiés rigoureusement par la *kachelofenverband*. Ainsi comme le mentionne le rapport de 2016 de l'ADEME sur "les poêles de masse artisanaux en France", il est recommandé d'utiliser pour les artisans poêlier le logiciel Basic 2+ qui reprend la norme EN15544.

Des test menés conjointement par L'AFPMA et la MHA ont conclu à l'impossibilité de prédire les échanges thermiques dans des cloches ou des contre-courants avec la méthode décrite dans EN15544, ainsi qu'à une différence notable de la durée d'une flambée due à un usage de combustible calibré plus gros qu'en Autriche.

Les échanges à faible vitesse en tronçon descendant sont sous-estimés par EN15544.

De nombreux autres essais et mesures ont été réalisés en Europe et en Amérique, mais ils sont basés sur des protocoles et des matériels trop hétérogènes pour permettre des comparaisons pertinentes. Très peu d'essais in situ ont été menés.

Les méthodes d'analyse de combustion et de mesure d'émissions actuelles supposent un débit constant de combustible, pertinent pour des foyers à rechargement mais inadaptés au poêle de masse car elles surestiment les émissions en début de flambée et les pertes thermiques en fin de flambée.

Des méthodes modernes d'analyse de combustion (Chemical mass balance) permettent d'affiner grandement les mesures et de tenir compte du caractère transitoire de la flambée dans un poêle de masse.

Actions précédentes

2012/2013

La rédaction d'une feuille de calcul reprenant EN15544 et une première campagne de mesure ont permis de constater que :

- cette méthode de calcul fonctionne bien pour les poêles de type autrichien, constitués d'un tronçon descendant juste en sortie de foyer, puis majoritairement de tronçons horizontaux séparés par quelques tronçons ascendants.
- les calculs en résultant pour des poêles à cloche, Finlandais ou encore Suédois... sont parfois très éloignés de la réalité, voir impossible car hors des bornes fixées par EN15544
- les caractéristiques d'échanges thermiques sont très différentes suivant l'orientation du conduit, particulièrement à faible vitesse, ce qui peut conduire à des écarts significatifs même en respectant les limitations posées par la norme.

Il en a été conclu que la modélisation de différents types de poêles est impossible si la feuille de calcul n'est basée que sur la norme EN 15544.

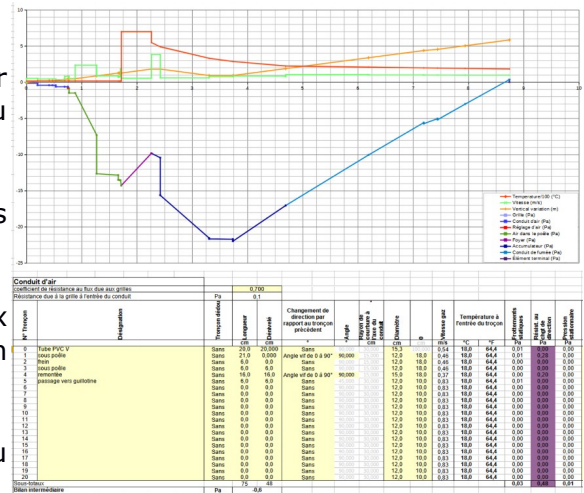
C'est pourquoi le comité technique de l'AFPMA a décidé d'enrichir la méthode décrite par EN15544 en la croisant avec la norme de thermo-aéraulique EN13384 qui autorise une plus

grande variété de forme de carneaux et une plus grande plage de vitesse, mais qui ne décrit pas les échanges en tronçon descendant. Cette lacune devra être comblée.

2013/2014

Le projet MCE (Méthode de Calcul Étendue) consistant à construire un outil de modélisation universel intégrant tous les types d'échangeurs aboutit à la rédaction d'une nouvelle feuille de calcul. Cet outil permet de :

- choisir la durée de la combustion pour s'adapter à la taille et à la nature du combustible (bois tendre ou dur)
- modéliser des tronçons descendants avec un calcul différencié
- modéliser des carneaux aux proportions très éloignées du carré (avec un rapport dépassant 1/3)
- visualiser les résultats tout au long du parcours



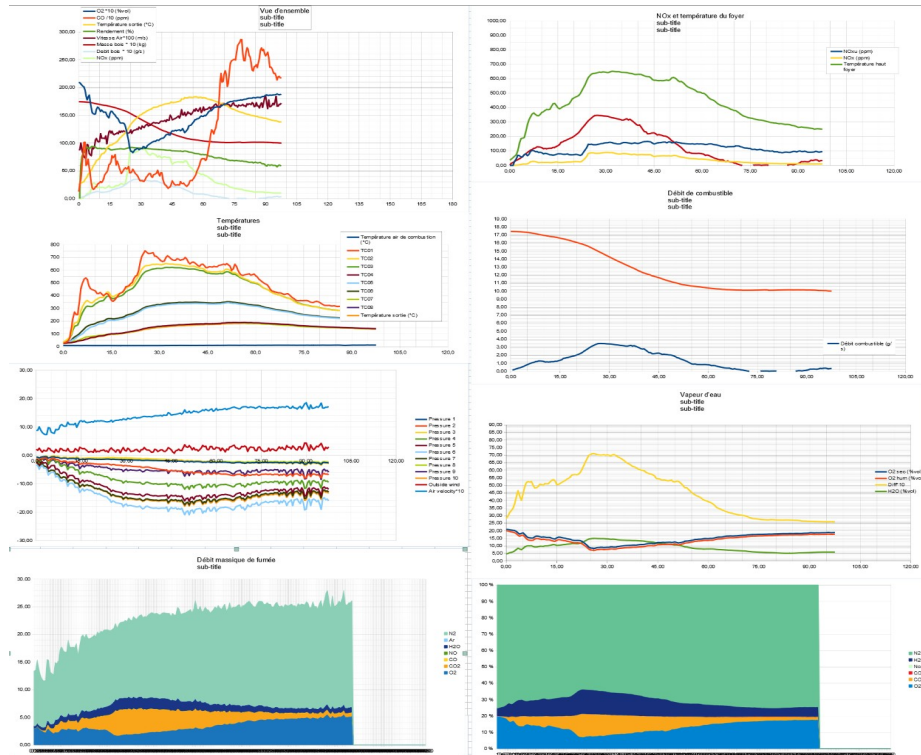
Le continent nord américain connaissant la même problématique que la France : sans tradition homogène, un parc de poêles très varié et une modélisation autrichienne ne pouvant répondre à leurs besoins énoncés par l'EPA, la MHA (Masonry Heater Association of North America) et l'AFPMA se sont naturellement rapprochés pour travailler sur des solutions de modélisation. Ainsi, dans le cadre de l'évolution des normes, la commission technique de l'AFPMA coordonne depuis plusieurs années le projet MCE. Celle de la MHA est motrice sur la partie mesure des émissions.

2015/2020

Le laboratoire américain est adapté pour répondre aux besoins spécifiques de test visant à affiner et valider la MCE, avec un gros foyer de 26kg. Dans le même temps L'AFPMA monte un premier laboratoire en France avec un petit foyer de 9kg. Plusieurs campagnes de mesures sont menées, un logiciel de supervision est rédigé permettant la collecte de 56 points de mesures. Ce partenariat fructueux permis de :

- valider la MCE pour des tronçons descendants et au facteur de forme allant jusqu'à 1 pour 8
- Valider les calculs de pertes de charges
- documenter les débits de combustibles
- mesurer des émissions avec une méthode portable (CONDAR)
- avoir une première approche des taux de vapeur d'eau





Visualisation de mesures issue du premier laboratoire de l'AFPMA

2021/2022

La construction et l'aménagement d'un nouveau laboratoire en France mobilise une grande part de l'énergie bénévole de l'AFPMA.



Objectifs du programme scientifique

Le laboratoire de l'AFPMA souhaite adapter la méthode de calcul autrichienne à tous les types d'échangeurs et faire un état des lieux des performances énergétiques et environnementales des différents types de construction de poêle de masse.

- Calibration et validation de la Méthode de Calcul Étendue (MCE) permettant de prédire le comportement de tronçons aussi bien ascendant, descendants qu'horizontaux, avec des facteurs de proportion étendus allant jusqu'aux cloches.
- Étude des différents type de foyers poêle de masse artisanaux en terme d'émissions de condition de fonctionnement et de leurs spécificités propres à permettre le calcul
- Établissement de corrélation entre la méthode de laboratoire et la méthode de terrain de mesure des émissions pour pouvoir mener des campagnes de mesure in situ
- Exploration des possibilités d'affiner les mesures de rendement et d'émissions

Le laboratoire cherche à considérer et à calculer le poêle dans son ensemble, en situation réelle.

Perspectives et moyens associés

L'ambition est bien de créer un cursus de formation et des outils associés pour permettre le dimensionnement et la réalisation d'une diversité de poêles de masse et de créer un référentiel qui ne soit pas lié à un seul mode constructif. D'où la nécessité de mettre des moyens techniques et scientifiques supplémentaires pour acquérir ces connaissances nouvelles.

Afin d'anticiper l'évolution des normes et l'hétérogénéité des configurations qui seront mesurées, le laboratoire de l'AFPMA se dote de moyens supplémentaires (instrumentation spécifique). La gamme de mesures à réaliser est importante.

Les premières tâches de ce lot consistent donc à avoir un laboratoire instrumenté ainsi que des premiers jeux d'essais répétitifs pour pouvoir commencer à en exploiter les résultats et alimenter les modèles de calculs qui seront présents dans le logiciel.

Les précédentes actions ayant montré la difficulté du bénévolat face à l'ampleur des travaux à accomplir, le travail d'autres membres de l'AFPMA pour trouver des financements a permis d'embaucher un technicien de laboratoire et un informaticien dont le premier objectif est la création du logiciel de dimensionnement.

Comportement thermo-aéraulique d'échangeurs

Les premiers essais et analyses réalisés au laboratoire de l'AFPMA ont mis en évidence la limite du modèle thermo-aéraulique de la NF EN 15544, comme déjà évoqué dans les "actions précédentes".

Les vitesses de circulations dans les carreaux de cheminement de fumées admises dans cette norme sont de 1.2 m/s à 6.0 m/s. Cette plage de vitesse peut-être assez limitante en pratique, notamment pour des configurations où il est nécessaire de faire circuler les gaz lentement afin d'éviter des pertes de charges trop importantes, qui ne peuvent être compensées par les forces ascensionnelles (conduit d'évacuation ou autres colonnes montantes d'air chaud). Une

stratégie possible est l'utilisation d'échangeurs de type "cloche", de grands volumes au regard des débits. La vitesse de circulation y est alors inférieure à 1.2 m/s, les fumées chaudes se stratifient et les échanges de chaleurs ne sont plus turbulents. Les transferts thermiques changent de nature, ce qui explique pourquoi les méthodes de calculs de la NF EN 15544 ne sont alors plus valables.

En pratique, cela se traduit par l'impossibilité de réaliser des échangeurs de type cloche qui seraient plus adaptés dans ces configurations ou le "quota" de tirage disponible manque.

De même, dans le cas où l'échangeur comporte des longueurs significatives de cheminements de fumées descendants (poêle Finlandais à contre-courant), les modèles ne sont plus adaptés. C'est ce qu'indiquent les résultats préliminaires des essais menés au laboratoire de l'AFPMA.

Le programme scientifique du laboratoire inclut cet aspect afin de mieux comprendre la nature des transferts thermiques présents dans ces échangeurs qui ont été assez peu étudiés.

Au niveau de l'instrumentation et essais nécessaires, cela suppose de pouvoir mesurer précisément et régulièrement, tout au long du cheminement de fumées, les grandeurs physico-chimiques importantes : température, pression différentielle. La composition des fumées, leur humidité relative, le débit associé sont également nécessaires. Ce type de mesure n'est pas réalisé dans le cadre des essais de certification pour les normes liées au chauffage au bois.

Il s'agira donc de définir les protocoles nécessaires, de prouver la robustesse des résultats et des modèles de calculs, ce qui permettra d'étendre le travail de connaissance des échangeurs.

Mesures des émissions, PM et COV

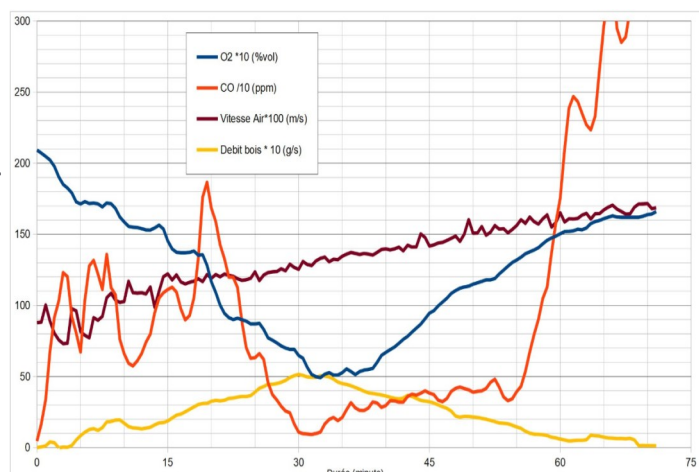
Un foyer pollue peu quand il est dans de bonnes conditions de fonctionnement. A contrario, une installation présentant trop ou trop peu de tirage conduit à augmenter les émissions, notamment en ce qui concerne les COV. Cette affirmation devra être démontrée. Elle est à la base de la démarche de développement de la MCE.

Différentes stratégies de combustion sont actuellement employées dans l'univers du poêle de masse, des foyers sur sole ou sur grille, ascendant descendant ou horizontal, avec ou sans réglages séparés de l'air primaire et secondaire, etc. Il apparaît important, pour orienter les recherches, de constituer un état des lieux en terme d'émissions des différentes approches.

Trois méthodes de chargement coexistent actuellement, chargement unique, chargement puis rechargement partiel et chargement par lot de taille constante. Très peu de données comparables ont été produites pour déterminer la méthode la moins polluante. Un état des lieux sur ce sujet permettra la aussi d'orienter les développements futurs de la façon d'utiliser et de concevoir les poêles de masse.

Le protocole de test décrit par EN16510 impose une dépression constante de 12Pa au niveau de la buse, il suppose aussi un débit constant. Cette méthode, en diluant les fumées en début de flambée pourrait conduire à sous-estimer les émissions par rapport à une mesure en tirage naturel. Une évaluation des différences dues à ces contraintes sera conduite.

Les protocoles supposent des débits de combustible constants, ce qui est une hypothèse peu adaptée au cas des poêles de masse, particulièrement pour une



charge unique. Ce point nous semble important à lever en mesurant précisément les émissions de particules avec des dispositifs et des protocoles qui prennent en compte un débit variable de combustible.

Une meilleure connaissance sur cette question permettrait de valoriser le plus faible niveau d'émission des particules fines dans le cas des poêles de masse si ceux-ci s'avèrent être plus performants en laboratoire, et *in situ*.

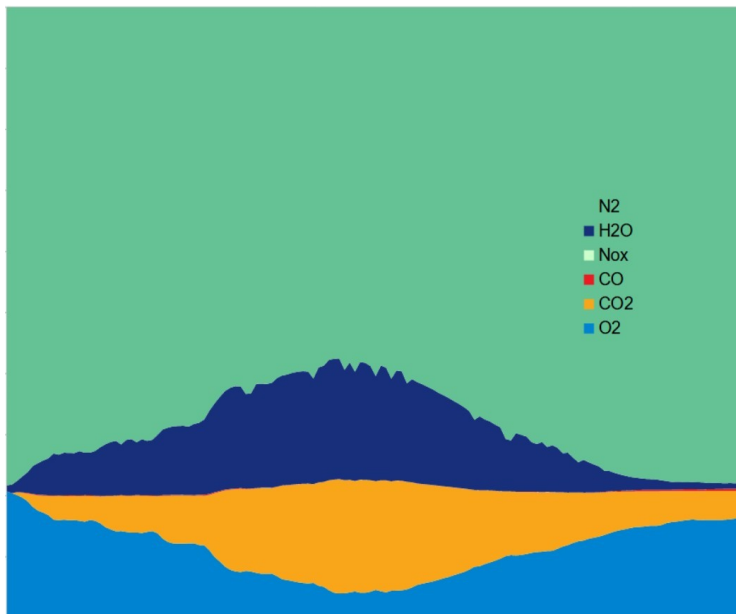
Pour cela, le laboratoire est pensé pour être à minimum mobile afin de réaliser des campagnes hors du laboratoire, pour compléter et avoir une idée de réalité des émissions sur le terrain. La méthode européenne de mesure des émissions est inadaptée à des mesure in-situ chez des particuliers, car trop difficile à déplacer et trop encombrant et trop fragile. La mesure sera réalisée à l'aide d'un tunnel de dilution à prélèvement partiel et d'un filtre à température ambiante (CONDAR), beaucoup plus légère et facile à déplacer. Cette méthode mesure l'émission partielle de particules, correspondant à la somme des particules solides et condensées.

Cette méthode nécessite l'établissement de corrélation avec la méthode officielle.

Nous pensons que ceci est un levier primordial afin d'explicitier scientifiquement les différences entre ces appareils de chauffage au bois. En effet, le chauffage au bois n'est pas toujours si écologique que l'imaginaire collectif le laisse supposer. Nous voulons apporter des éléments concrets et solides sur cette question en démontrant l'importance d'avoir des appareils performants, et propices à un usage optimal au quotidien.

Affiner la mesure du rendement

Les foyers sur sole ou lit de cendre ont démontré une diminution conséquente des émissions, nos confrères de la MHA ont constaté une réduction d'un facteur deux en passant d'un foyer sur grille à un foyer sur sole.



Cependant ce type de foyer souffre d'un protocole de mesure de rendement inadapté. Il est actuellement basé sur le taux de CO₂ pour déterminer la fin de la mesure. Nos campagnes précédentes d'analyse nous laissent penser que le taux de vapeur d'eau dans les fumées serait un marqueur bien plus pertinent pour déterminer la fin de la période de test. En effet, sur la fin de la flambée, on observe une décorrélation des taux d'H₂O et de CO₂, les foyers sur sole ne faisant pas passer d'air à travers le lit de braise, la phase de braise peu s'éterniser et contraindre l'opérateur à prolonger le test bien au-delà de ce qui est réellement pratiqué. Le taux de CO₂ stagne pendant une longue période

pendant laquelle l'air traverse inutilement le foyer. Une mesure fiable du taux H₂O est possible avec des capteurs TDLS, nous établirions des comparaisons qui pourrait conduire à proposer une modification du protocole de test.

Caractérisation précise de la puissance restituée

Seule la norme NF EN 15250 permet d'obtenir une courbe de restitution de chaleur (puissance de chauffe mesurée pendant la durée de chauffe du poêle). Avoir cette courbe à disposition est essentielle pour dimensionner un poêle de masse puisqu'elle permet de savoir si les pertes thermiques sont bien compensées par l'apport de chaleur du poêle.

En particulier, on déduit de cette courbe l'inertie du poêle, sa capacité thermique, les durées après allumage pour atteindre 100%, 50% ou 25% du pic de chaleur. Avec ces mêmes outils, il sera possible de mettre en évidence l'adaptation de la puissance de chauffe du poêle en fonction des températures des parois (étude thermique dynamique du déchargement du poêle).

Il serait également intéressant d'évaluer l'influence de l'existence ou non d'une régulation sur le poêle de masse en fonction du type d'habitat. Par exemple, pour estimer l'utilité d'abaisser la température de l'habitat durant les périodes d'absence, ou pendant une période d'apport solaire pour des habitats présentant peu d'inertie.

Ces courbes sont produites lors des essais dans le cadre de la norme NF EN 15250. Seulement la norme NF EN 15544 ne donne pas d'équivalent aussi précis. La *période d'accumulation* qui y est définie n'a pas la même définition et il est donc plus difficile pour des artisans poêliers d'avoir des données sur la puissance de chauffe après allumage d'un poêle maçonné *in situ*. Ces données seraient pourtant particulièrement utiles dans le cadre d'habitats avec peu de déperditions thermiques pour éviter les risques de surchauffe, par exemple.

L'AFPMA souhaite mieux caractériser les poêles conçus selon la NF EN 15544 sur ce point, mais aussi être capable de modéliser cette courbe pour d'autres types de modes constructifs et d'autres échangeurs. La géométrie des échangeurs et la vitesse de circulation des gaz influent sur les transferts de chaleur et donc, *in fine*, sur les températures des matériaux constituant l'accumulateur.

Appliquer un protocole similaire à celui de la NF EN 15250 sur des poêles maçonnés artisanaux selon NF EN 15544 et en extrapoler les résultats dans un modèle de calcul thermique, aboutira à l'apport de connaissances nouvelles sur le comportement thermique des poêles de conception non-unitaire.

Les notes de calculs générées par le logiciel pourront donc intégrer ces données sur la puissance de chauffe réelle du poêle, non moyennée. C'est un levier important pour intégrer le poêle de masse dans des logiciels de simulation thermique. Les bureaux d'études thermiques ont en effet besoin de ces données pour anticiper le comportement thermique des bâtiments qu'ils rénovent ou construisent.

Le risque est que ces bureaux d'études n'utilisent que des solutions de chauffage au bois caractérisées en laboratoire, dont le comportement est significativement différent à l'usage *in situ*. L'utilisateur doit alors faire avec un mode de chauffage inadapté à son besoin.

Acquisition, interprétation et partage des données

On le sait, les résultats d'analyse de combustion du bois bûche sont les moins répétables, les plus hétérogènes. L'humidité joue une part prépondérante dans cette variabilité, mais on peut aussi citer l'essence du bois, la taille des bûches, la présence d'écorce, de nœud, leur disposition, l'humidité relative de l'air comburant, le vent, les conditions initiales de température dans le foyer, etc...

Pour voir se dégager des tendances et poser des conclusions fiables, il est nécessaire de multiplier les tests mais aussi d'archiver correctement de très nombreux paramètres. Ce grand volume de données doit pouvoir être traité.

La mise en place d'une base de donnée est donc indispensable, elle permettra de comparer les prédictions de la MCE avec un grand nombre de flambées et de configurations, entre poêle de masse et poêle fonte. Elle permettra d'exploiter les résultats de mesures d'émission, de dégager des tendances, de comparer les modèles à la réalité. Elle sera aussi un outil de partage efficace avec d'autres structures.

Équipement

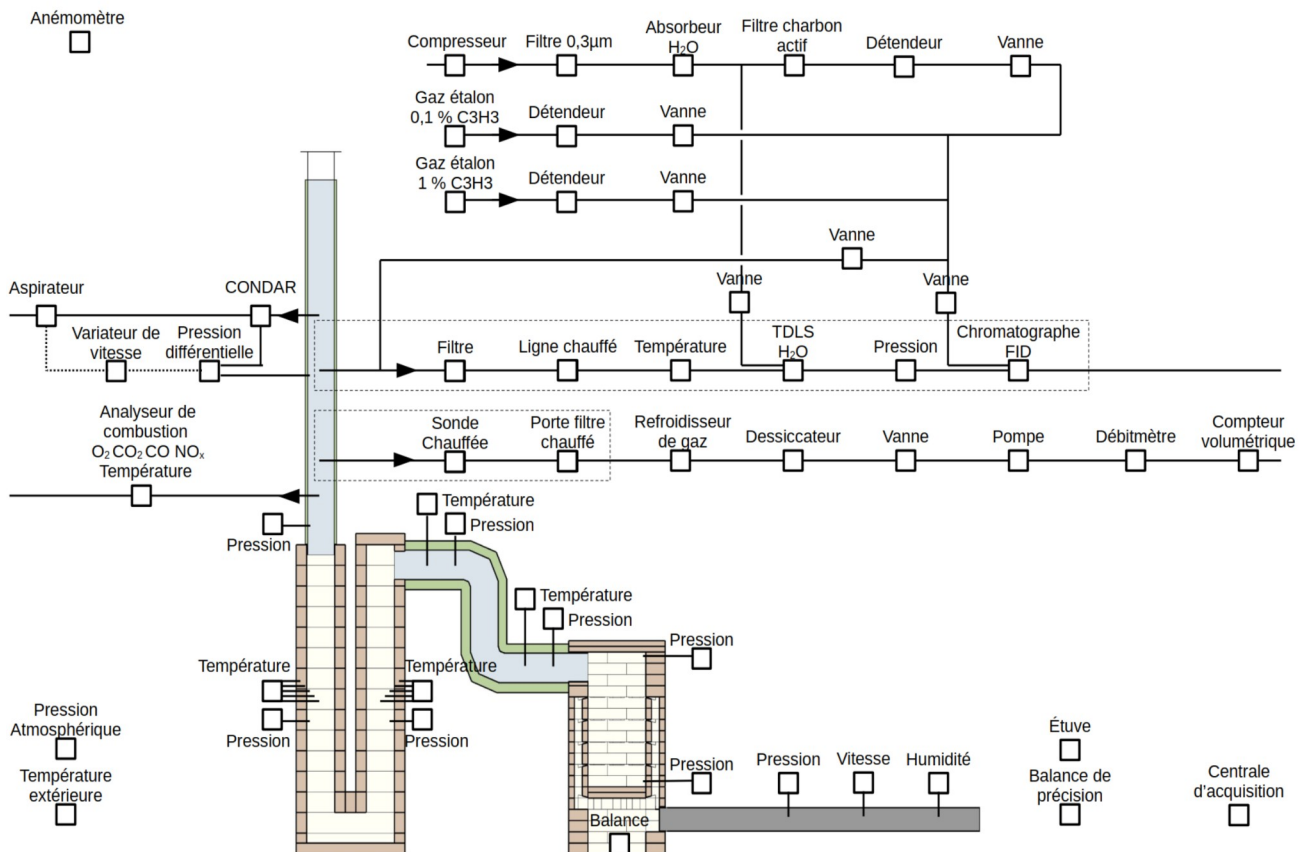


Schéma de Principe du laboratoire

Ce niveau d'équipement permettra facilement d'éditer nos résultats scientifiques, que d'autres spécialistes s'emparent de nos résultats, d'échanger plus facilement avec le laboratoire de recherche autrichien (Versuchs- und Forschungsanstalt der Hafner Österreichs).

- Détecteur Ionisation de Flamme (FID), mesure de COV
- Filtre chauffé, mesure de PM
- CONDAR, mesure des émissions in situ
- Balance de précision, émissions
- Etuve, émissions
- Thermocouples, thermo-aéraulique, supervision
- capteurs de pression différentielle, thermo-aéraulique
- Analyseur de combustion O₂/CO₂/CO/Nox, thermo-aéraulique
- TDLS H₂O, thermo-aéraulique
- Compresseur / Filtre / Assécheur/régulateur pour air instrument